



Identyfikacja sygnałów pomiarowych pozyskanych przy przejeździe pociągu po torze z rozpoznaniem uszkodzeniem

dr hab. Piotr Kozioł, prof. PK

Politechnika Krakowska

Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu

piotr.koziol@pk.edu.pl

www.wil.pk.edu.pl

dr inż. Piotr Tokaj

Instytut Kolejnictwa

Pracownia Hamulców w Krakowie

ptokaj@ikolej.pl

www.ikolej.pl

Warszawa, 9 kwietnia 2024 r.

PLAN PREZENTACJI cz.1

Definicje

Cel pracy

Tezy pracy

Geneza

Metodyka badań

Opis prac i wyników doświadczalnych

Wnioski

PLAN PREZENTACJI cz.2



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki



Faculty of
Civil
Engineering

Współpraca międzynarodowa – potrzeba badań.

Modelowanie odpowiedzi dynamicznej toru.

Podejście semianalityczne (aproksymacja falkowa).

Przykłady analizy falkowej.

Jakość eksploatacyjna inaczej nazywana jakością użytkową produktu, „jest miarą satysfakcji, jakiej doznaje użytkownik w związku z jego posiadaniem i użytkowaniem” . Jest „stopniem zgodności obsługi w sferze poprodukcyjnej wyrobu z wymaganiami projektu”

Jakość eksploatacyjna drogi szynowej to bezpieczeństwo jazdy i komfort zarówno pasażerów podróżujących pociągiem jak również użytkowników otoczenia linii kolejowej (głównie hałas powstający przy przejeździe pociągu i drgania obiektów budowlanych usytuowanych wzdłuż szlaku kolejowego).

DEFINICJE

Komfort jazdy:

Pod pojęciem komfortu podróży należy rozumieć stan satysfakcji fizycznej i umysłowej związany z przemieszczaniem się z punktu A do B. Składają się na niego: poczucie bezpieczeństwa, wygoda, relaks, przyjemność i zadowolenie

Jakość geometryczna toru:

Ocena odchyłek od średniej lub projektowanej charakterystyki geometrycznej danych parametrów, w płaszczyznach pionowej i poziomej, które mają wpływ na bezpieczeństwo lub wykazują korelację z komfortem jazdy (PN-EN 13848-1).

Głównym kryterium kontroli jakości toru, jest przekroczenie określonych wartości przyspieszeń mierzonych w kierunku pionowym, przy jednoczesnym pomiarze w kierunku wzdłużnym i bocznym zgodnie z normą PN-EN 14363 (badano również hałas generowany przez przejeżdżające pociągi, zgodnie z normą PN-EN ISO 3095:2013-12).

CEL PRACY

Cel naukowy:

Pokazanie możliwości wyeliminowania opomiarowania drogi szynowej na rzecz badania jej dynamiki z poziomu pojazdu z wykorzystaniem symulacyjnych badań numerycznych.

Cel użytkowy:

Stworzenie narzędzia do oceny jakości eksploatacyjnej drogi szynowej, na podstawie wybranych parametrów przebadanych eksperymentalnie, oraz wykorzystanie uzyskanych wyników do modyfikacji obowiązujących przepisów, dotyczących bezpieczeństwa eksploatacji.

Badanymi parametrami są: prędkość i przyspieszenia drgań, mierzone w trzech kierunkach, chropowatość powierzchni koła oraz kształt i pole powierzchni kontaktu koła i szyny (plus hałas i zapis obrazu).

Parametry oddziaływania układu pojazd – droga szynowa, mierzone w pojeździe pozwalają na ocenę zarówno stanu pojazdu jak i stanu drogi szynowej z uwagi na bezpieczeństwo, trwałość oraz komfort pasażerów i otoczenia.

Parametrami tymi są podstawowe miary jakości eksploatacyjnej infrastruktury transportu szynowego: prędkość i przyspieszenia drgań w trzech kierunkach.

Wartości sygnałów przyspieszeń drgań (w konsekwencji obciążeń) mierzonych na korpusach łożysk i we wnętrzach pojazdów, mogą być wykorzystane do praktycznej oceny jakości eksploatacyjnej drogi kolejowej, służąc jednocześnie diagnozie bieżącego stanu technicznego pojazdu.

GENEZA PRACY - Rozwiązania konstrukcyjne drogi kolejowej



Rys.1 Podkłady drewniane z przytwierdzeniem hakowym.
Linia znaczenia miejscowego.



Rys.2 Podkłady drewniane, z przytwierdzeniem śrubowym „K”.
Linia drugorzędna.



Rys.3 Podkłady betonowe, z przytwierdzeniem sprężystym „SB”.
Linia magistralna.



Rys.4 Podkłady stalowe typu Y z przytwierdzeniem sprężystym „SB”.
Linia góraska.

Wymienione rodzaje dróg kolejowych spełniają wymagania w określonych przedziałach prędkości i nacisków osi na tor.

Jakość eksploatacyjna tych nawierzchni kolejowych nie jest taka sama.

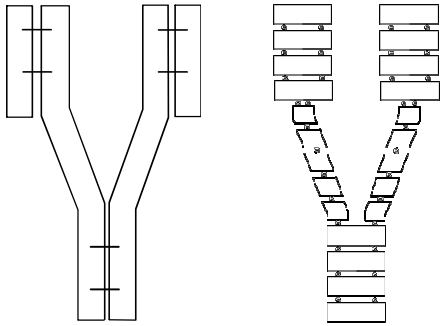
Brakuje narzędzi do identyfikacji danego typu nieprawidłowości dla drogi szynowej i pojazdów.

Celem przeprowadzonych symulacji komputerowych i badań doświadczalnych, jest zminimalizowanie ruchu pionowego środka wózka pojazdu szynowego oraz zmniejszenie przemieszczeń pionowych toru.

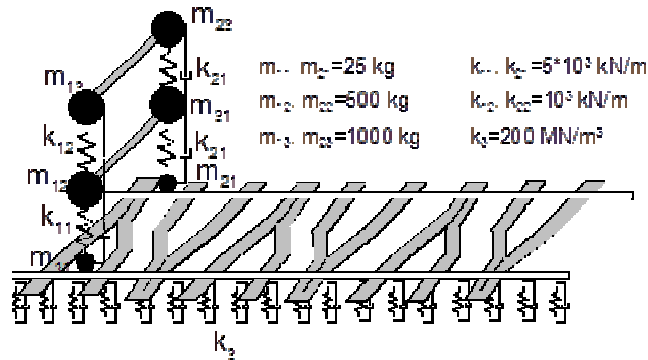
METODYKA BADAŃ (w ramach doktoratu)

1. Przygotowanie bazy teoretycznej w oparciu o analizę dostępnych modeli toru.
2. Dokonanie wyboru uproszczonych modeli toru na podstawie kryterium dostępności narzędzi komputerowych.
3. Zbudowanie stanowiska laboratoryjnego z modelem rzeczywistym toru kolejowego w skali 1:1, przy wykorzystaniu uzyskanych wcześniej wyników symulacyjnych do jego kalibracji.
4. Rozszerzenie zastosowania skalibrowanego toru na stanowisku laboratoryjnym o zastosowanie różnych rodzajów podkładów kolejowych (stalowych i ciężkich betonowych) dotychczas nie używanych w Polsce.
6. Zmodyfikowanie toru kolejowego z podkładami typu Y na linii 117 przez zmianę parametrów przechytki.
7. Wykonanie testów kontrolnych na Torze Doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie.
8. Wykorzystanie wyników symulacji komputerowych przy badaniu pociągu dużej prędkości na CMK.
10. Zgromadzenie danych (zróżnicowanych w zależności od typu pojazdu) dotyczących:
 - a. usterek pojazdów i infrastruktury,
 - b. zależności związanych ze stosowaniem różnych rodzajów materiałów hamulców (hałas), profilu kół, nacisków kół na szyny,
 - c. rozbudowy bazy sprzęgającej wymienione cechy z kształtem obszaru kontaktu koła z szyną w funkcji profilu kół i szyn.

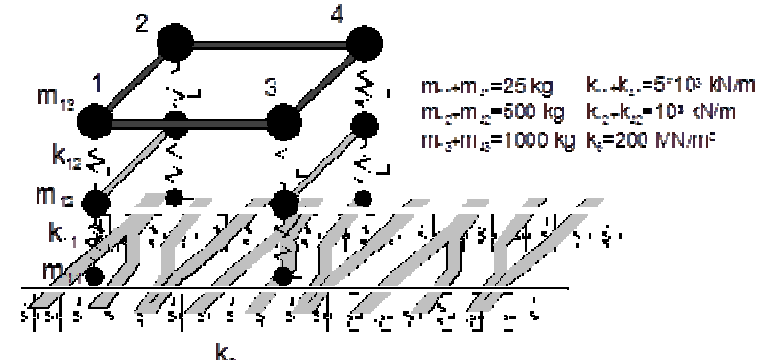
Stworzenie modeli numerycznych odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy torów i pojazdów



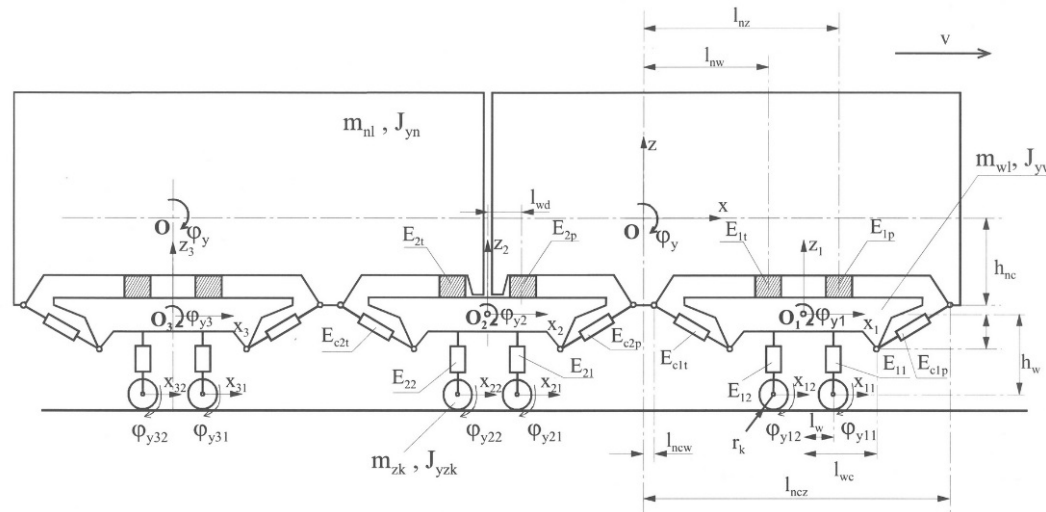
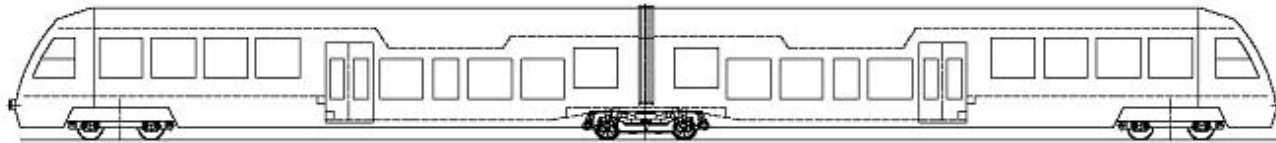
Rys.5 Ciągły i zdyskretyzowany, model podkładu typu Y



Rys.6 Model pojedynczego zestawu kołowego, na torze typu Y



Rys.7 Model całego wózka na torze typu Y

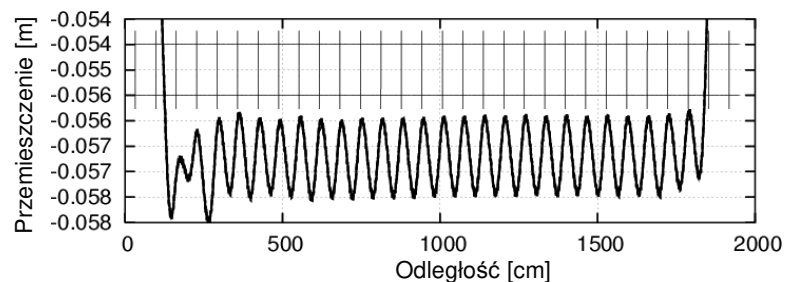


Rys.8 Widok pojazdu typu 218Mc i jego model

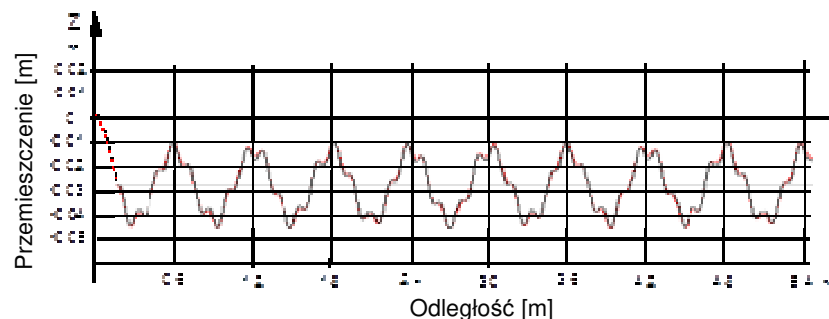
Ewolucja modelu obliczeniowego na podstawie analiz etapów prowadzonych badań numerycznych.

OPIS PRAC I WYNIKÓW

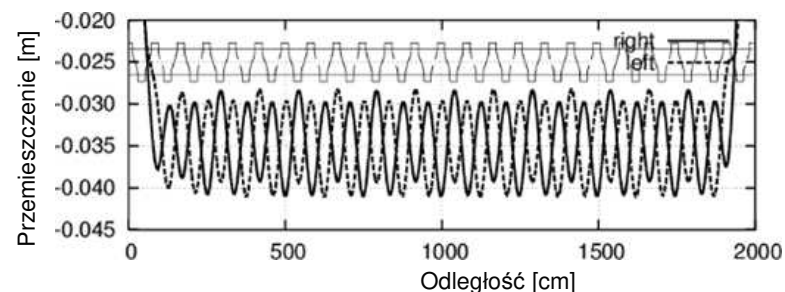
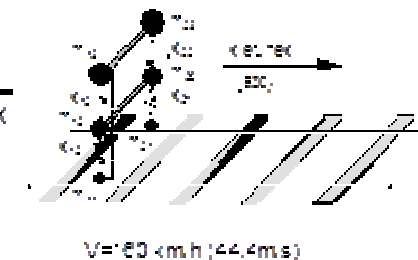
Porównanie rozwiązania opracowanych modeli, uzyskanych w programach autorskim i komercyjnym



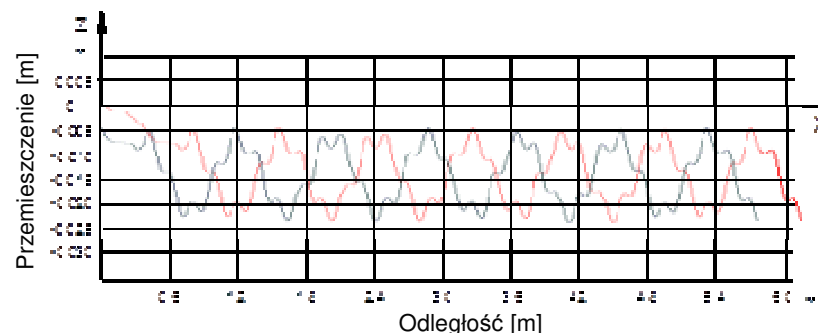
Rys.9 Przemieszczenia środka szyny na torze normalnym uzyskane w „programie autorskim”*



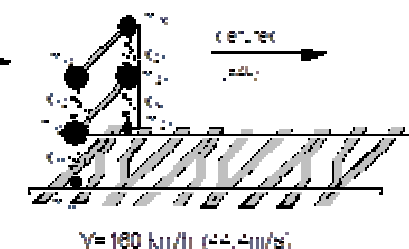
Rys.10 Przemieszczenia środka szyny na torze normalnym uzyskane w systemie MEDYNA



Rys.11 Przemieszczenia środka szyny na torze typu Y uzyskane w programie autorskim*



Rys.12 Przemieszczenia środka szyny na torze typu Y uzyskane w systemie MEDYNA



Przemieszczenia środka szyny obserwowane w dwóch niezależnych programach dają podobne wartości i charakter zachowania układu.

*"program autorski" – program obliczeniowy stworzony przez prof. dr. hab. Czesława Bajera w IPPT PAN, przy udziale autora pracy

OPIS PRAC I WYNIKÓW

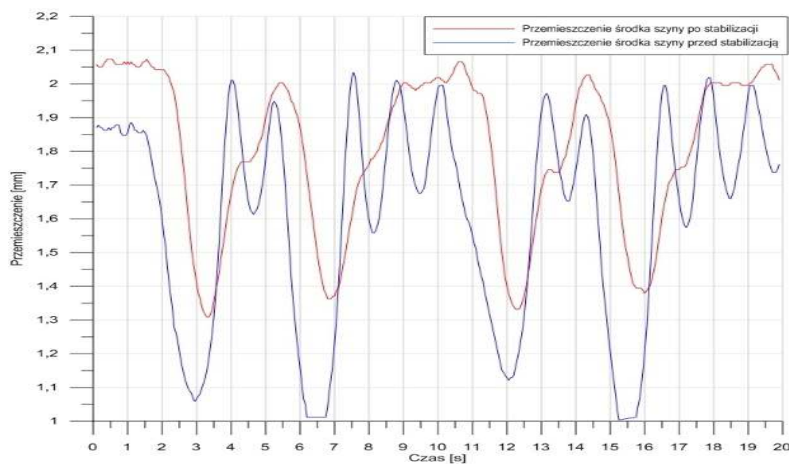
Koncepcja i stworzenie stanowiska do badań laboratoryjnych torowiska w skali 1:1



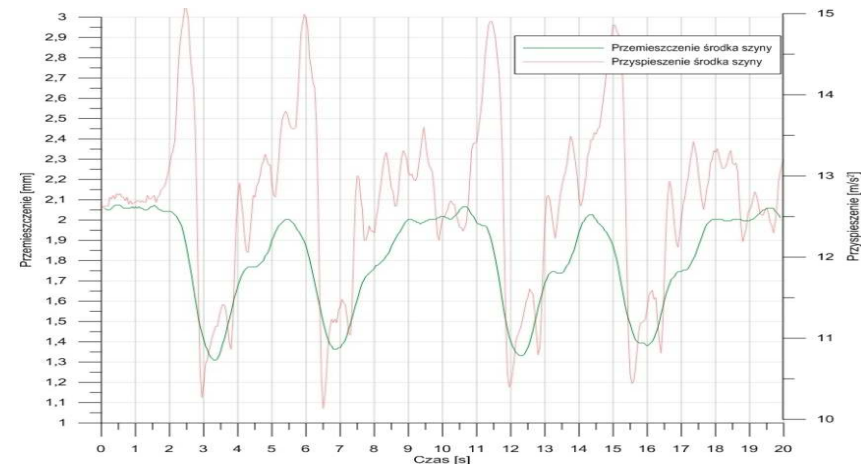
Rys.13 Laboracyjne stanowisko badawcze



Rys.14 Widoczny odcinek toru typu Y na stanowisku badawczym



Rys.15 Przemieszczenia środka szyny przed i po stabilizacji torowiska na stanowisku laboratoryjnym

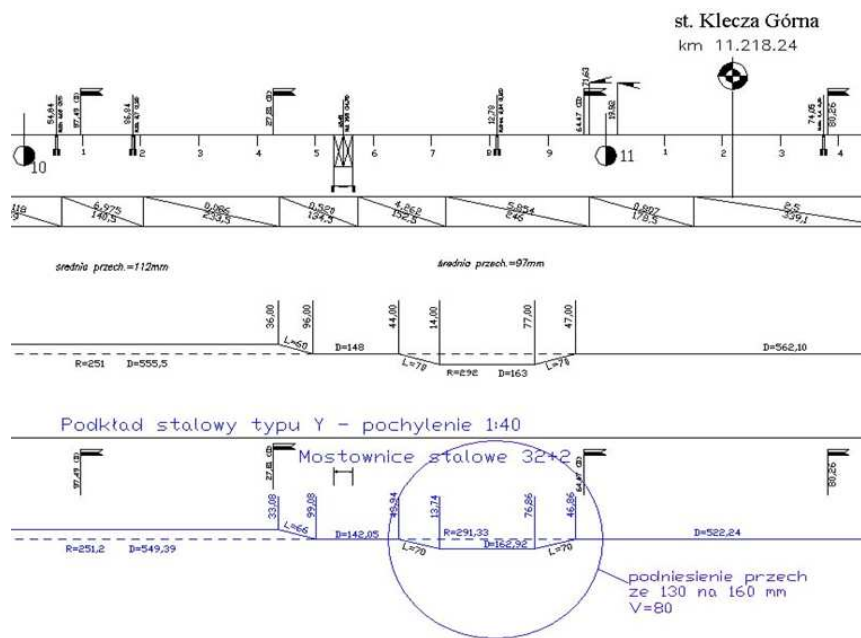


Rys. 16 Pomiary przemieszczeń pionowych szyny oraz przyspieszeń środka szyny (w warunkach laboratoryjnych) przy przejeździe wagonu towarowego o masie 29 t brutto z prędkością 60km/h,

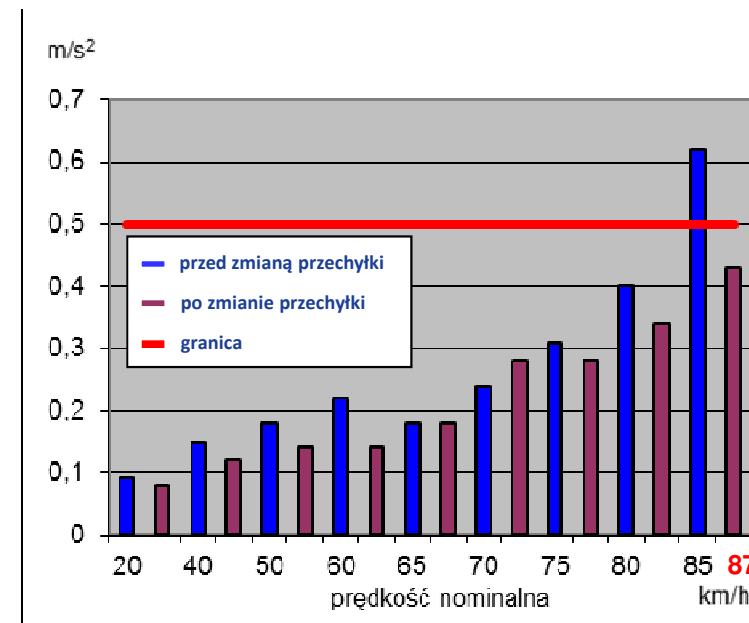
Wpływ stabilizacji toru w początkowym i ostatnim etapie badań.

OPIS PRAC I WYNIKÓW

Badania rzeczywistych pojazdów, na linii kolejowej nr 117 z podkładami typu Y



Rys.17 Schemat odcinka pomiarowego na linii 117



Rys.18 Przyspieszenie poprzeczne Y_q -RMS mierzone w pojeździe, w funkcji prędkości

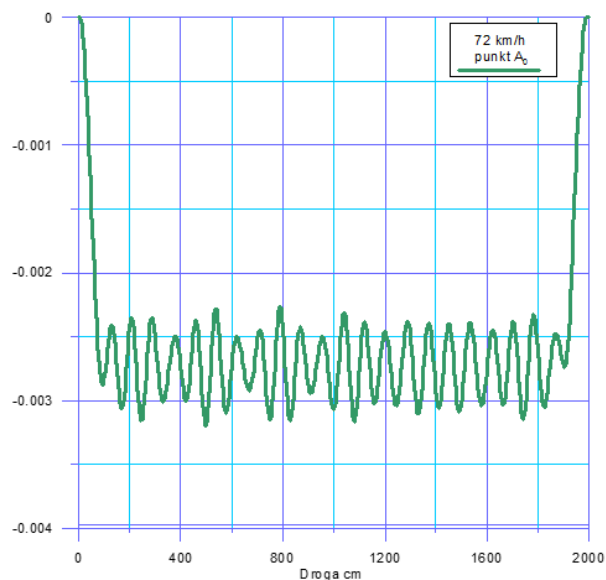
Na podstawie analiz numerycznych i badań laboratoryjnych podjęto decyzję o zmianie przechyłki toru typu Y.

Zmiana przechyłki obniżyła wartość przyspieszenia odśrodkowego mierzonego w pojeździe, co pozwoliło na zwiększenie prędkości przy zachowaniu komfortu i warunków bezpieczeństwa.

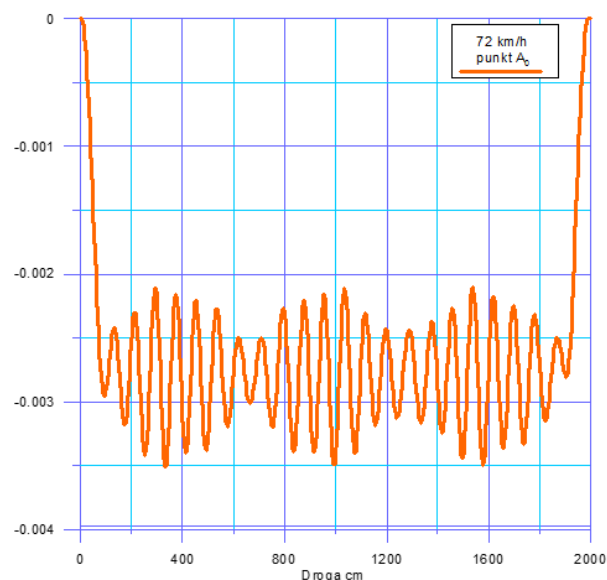
OPIS PRAC I WYNIKÓW

Porównanie wyników symulacji wykonanych na modelach i podczas badań rzeczywistych pojazdów

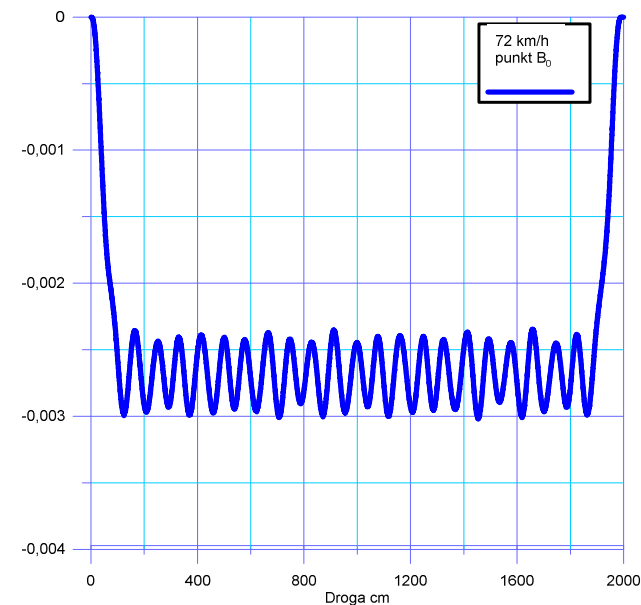
Przejazd pociągu EMU 250 z prędkością ~ 72 km/h po podkładach belkowych (PS-94) i nacisku 7,8 t/koło.



Rys.19 Wyniki symulacje ugięcia
środką szyny w systemie MEDYNA



Rys.20 Wyniki symulacji ugięcia
środką szyny w „programie autorskim”

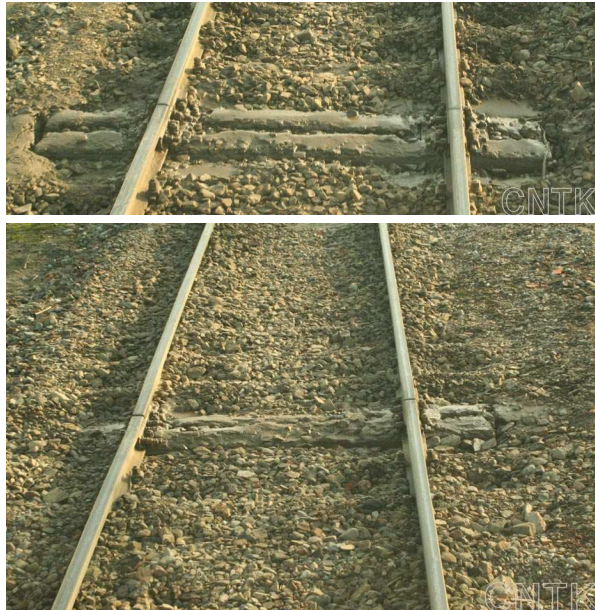


Rys.21 Wyniki otrzymane na
rzeczywistym pojeździe po zmianie
przechyłki, przed stabilizacją
(po obróbce filtrem 150 Hz)

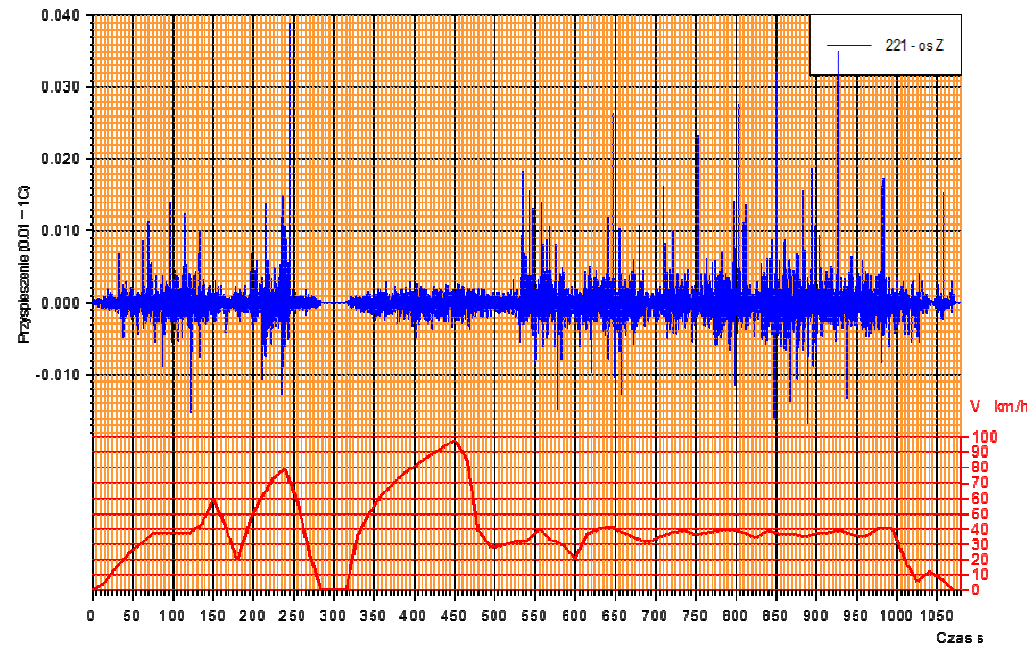
Wykazano jakościową i ilościową zgodność obliczonych i zmierzonych wartości ugięć środka szyny.

OPIS PRAC I WYNIKÓW

Ocena eksploatacyjna drogi szynowej mierzona z poziomu pojazdu



Rys.22 Uszkodzenie torowiska w postaci „wychlapki”



Rys.23 Przyspieszenia pionowe zmierzone na obudowie łożyska autobusu szynowego – wyniki uzyskane na trasie Kraków Główny – Balice przed modernizacją linii



Rys.24 Czujniki przyspieszeń zamontowane na obudowie łożyska autobusu szynowego

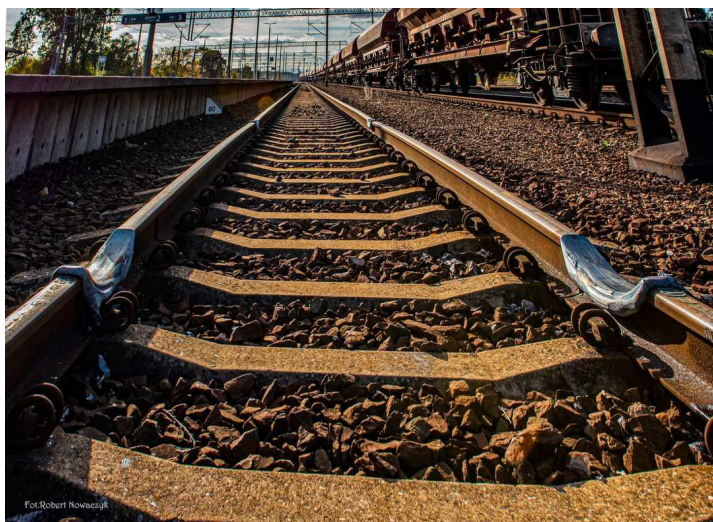
Jedno z pierwszych zastosowań metod oceny jakości eksploatacyjnej drogi szynowej do analizy stanu toru, za pomocą czujników zamocowanych na pojeździe. Pomysł i sposób montażu aparatury pomiarowej wraz z obróbką uzyskanych wyników jest własnością autora pracy. Obecnie, dzięki rozwojowi sprzętu badawczego, pomiary te można wykonywać za pomocą czujników bezprzewodowych, co znacznie upraszcza proces rejestracji i analizy wyników.

OPIS PRAC I WYNIKÓW

Ocena eksploatacyjna drogi szynowej mierzona z poziomu pojazdu



Rys.25 – 28 Uszkodzenia szyn w postaci „wybuksowania”



Autor: Robert Nowaczyk

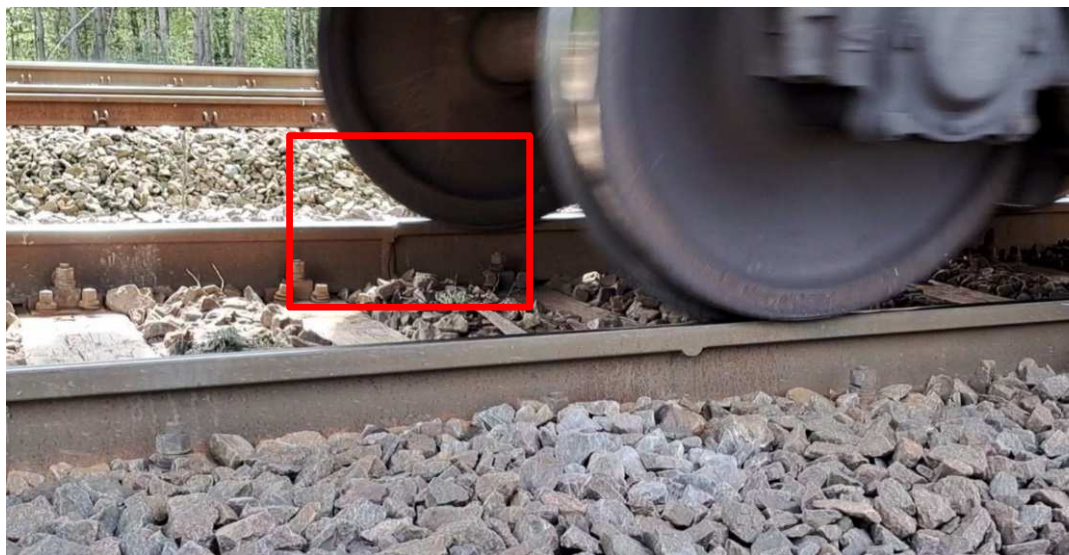


Autor: Robert Nowaczyk

OPIS PRAC I WYNIKÓW

Ocena eksploatacyjna drogi szynowej mierzona z poziomu pojazdu

Rys.29 Pęknięcie szyny
w miejscu spawania



Rys.30 Pęknięcie szyny
w miejscu spawania



OPIS PRAC I WYNIKÓW

Ocena stanu pojazdu



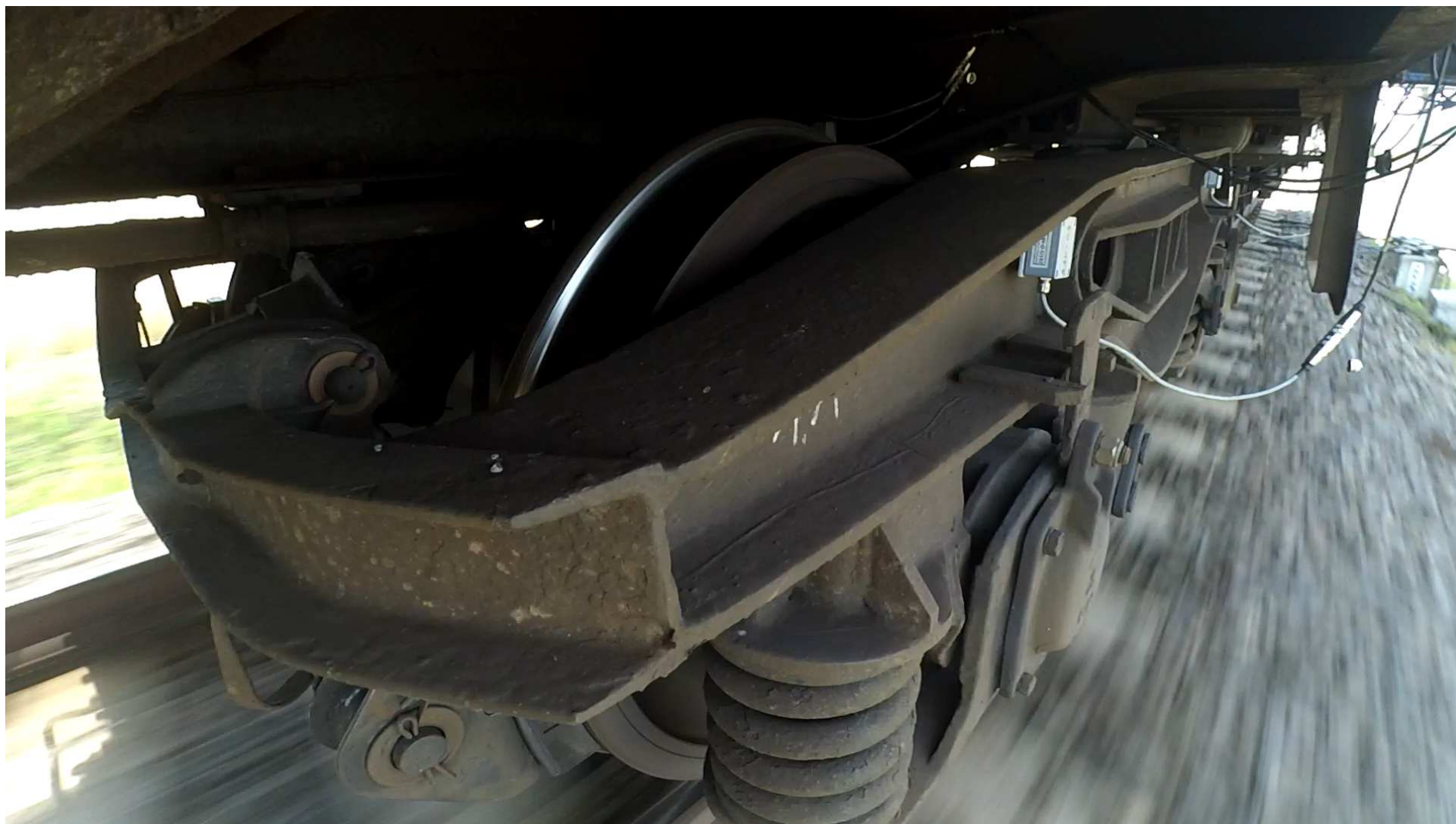
Rys.31 Zużyte obrzeże zestawu kołowego



Rys.32 Pomiar parametrów profilu koła

OPIS PRAC I WYNIKÓW

Ocena stanu pojazdu



Rys.33 Pomiar przyspieszeń na ramie wózka

OPIS PRAC I WYNIKÓW

Ocena stanu pojazdu



Rys.34-36 Uszkodzona powierzchnia toczna koła



OPIS PRAC I WYNIKÓW

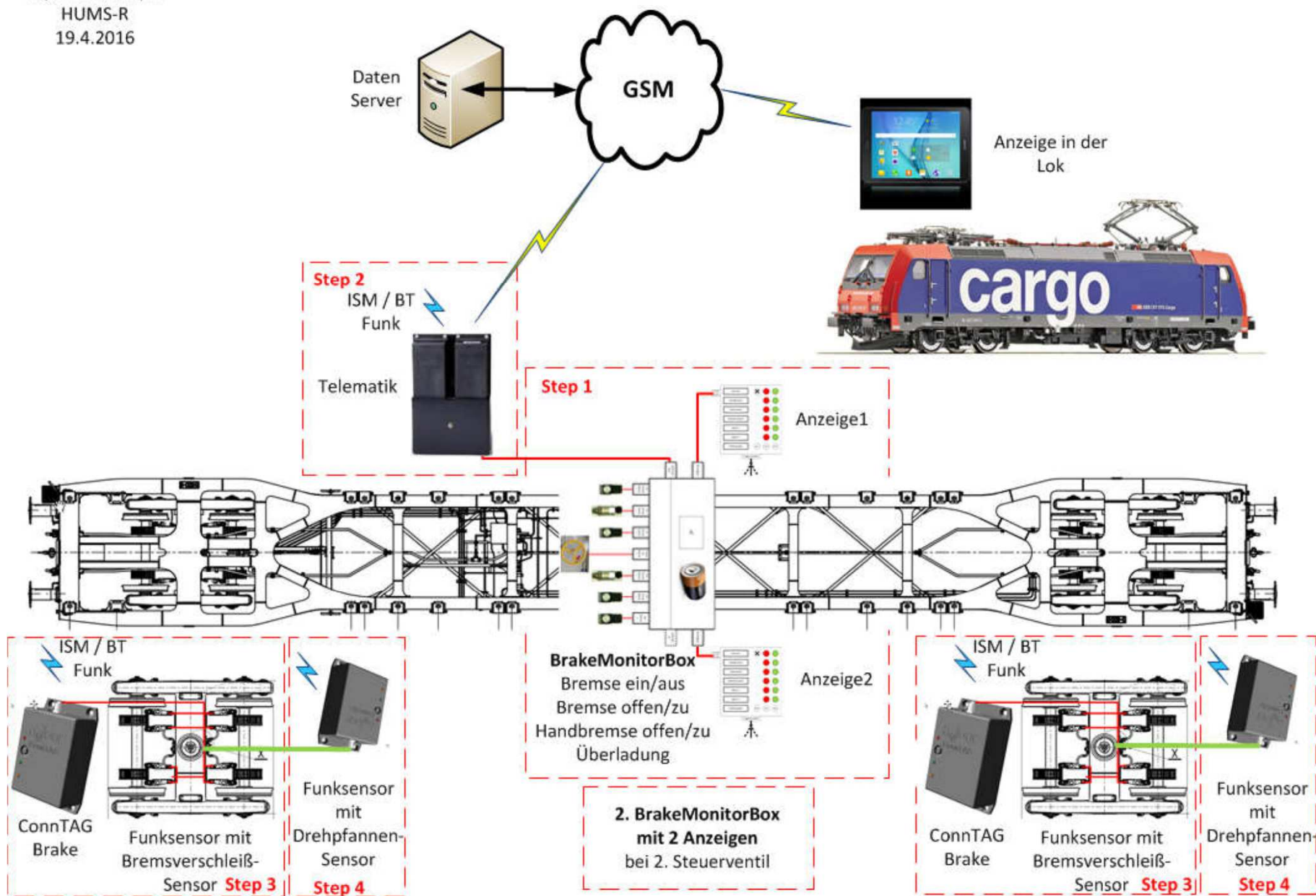
Ocena stanu pojazdu

Systemkonzept
HUMS-R
19.4.2016

Źródło:



VERBAND DER GÜTERWAGENHALTER
IN DEUTSCHLAND E.V.



WNIOSKI

Praca dotyczy istotnych problemów związanych z diagnostyką toru kolejowego i pojazdów szynowych, nawiązuje do ważnych zagadnień dynamiki drogi szynowej, takich jak:

- metody wyznaczania przemieszczeń toru wywołanych przejazdem pociągu z uwzględnieniem różnych charakterystyk podłoża,
- Wykorzystanie analitycznych i numerycznych rozwiązań w badaniach symulacyjnych dotyczących jakości toru.

Celem pracy jest pokazanie możliwości wyeliminowania opomiarowania drogi szynowej na rzecz badania diagnostycznego prowadzonego z poziomu pojazdu, wspomaganego badaniami symulacyjnymi. Dotychczasowe prace będą rozbudowane o nowe techniki pomiarowe, symulacyjne i diagnostyczne, wraz z zastosowaniem analizy sygnałów i stworzenie baz danych służących dalszej analizie.

Odpowiednia selekcja i porównanie wyników wykazują, że przejazd prawidłowo oprzyrządzonym pojazdem daje obraz zarówno stanu toru jak również odstępstw będących wynikiem awarii pojazdu.

Bieżące analizy wyników zebranych z pojazdów, mogą pozwolić na szybką diagnostykę stanu pojazdu i toru, co przekłada się na czas naprawy i koszty z nią związane.

POTWIERDZENIE TEZ pracy doktorskiej

Rezultaty wyselekcjonowane spośród wszystkich wyników badań otrzymanych w trakcie realizacji doktoratu wykazują, że pomiar podczas przejazdu odpowiednio oprzyrządowanym pojazdem daje odpowiedzi odzwierciedlające zarówno stan toru jak też anomalie będące konsekwencją awarii pojazdu.

Cel użyteczny pracy został osiągnięty, czego przykładem jest wprowadzenie zmian w rozporządzeniu MTiGM nr 151, na podstawie pozytywnych wyników badań uzyskanych na linii 117 (linia górską z torem bezстыkowym, na podkładach stalowych typu „Y”). Fragment nowego rozporządzenia brzmi:

„W łukach o promieniu nie mniejszym niż 190 m, w torach głównych dodatkowych i bocznych oraz w łukach o promieniu nie mniejszym niż 250 m, w torach szlakowych i głównych zasadniczych odstępuje się od wymagań, o których mowa w ust. 3 pkt 1 i 4 [140], i stosuje się tor bezстыkowy...”

PLAN PREZENTACJI cz.2



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki



Faculty of
Civil
Engineering

1. Współpraca międzynarodowa – potrzeba badań.
2. Modelowanie odpowiedzi dynamicznej toru.
3. Podejście semianalityczne (aproksymacja falkowa).
4. Przykłady analizy falkowej.

Współpraca



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Iceland
Liechtenstein
Norway grants



Norway grants

Working together for a **green,**
competitive and **inclusive** Europe

Sustainable Maintenance and Rehabilitation of Railway Track (SMART)

EEA Bilateral Relations Project



2

Współpraca



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Noise and Vibrations as a Driver for Sustainable Condition Based Predictive Maintenance and Rehabilitation of Metro Track (NOVIS)

- **Nova University Lisbon**
- **Metro Lisboa**
- **Cracow University of Technology**
- **OsloMet**
- **NTNU Trondheim**

The main innovative challenge of the NOVIS proposal is to pave the way for a **new paradigm of metro track maintenance and rehabilitation that provides a transition from preventive to predictive actions**, condition-based, following alert levels derived from acoustic and vibration signals collected by a real-time data acquisition system during train passages and integrated into digital twin models.

Modelowanie odpowiedzi dynamicznej toru



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Beam on viscoelastic linear foundation (foundations usually used for rail track analysis)

Winkler foundation

$$EI \frac{\partial^4 W(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial W(x, t)}{\partial t} + k_L W(x, t) = P(x, t)$$

k_L [N/m²] – foundation stiffness

Pasternak foundation

$$EI \frac{\partial^4 W(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial W(x, t)}{\partial t} + k_L W(x, t) - k_S \frac{\partial^2 W(x, t)}{\partial x^2} = P(x, t)$$

k_L [N/m²] – foundation stiffness

k_S [N/m²] – foundation shear parameter

4

Modelowanie odpowiedzi dynamicznej toru



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Double-beam system on linear foundation

$$EI_u \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m_u \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) + k_u (u - w) = P(x, t)$$

Two coupled equations

$$EI_w \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_w \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_w \frac{\partial w}{\partial t} + k_w w - c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) - k_u (u - w) = 0$$

u and w – vertical displacements of upper and lower beam, respectively;

EI_u, m_u – bending stiffness and unit mass of upper beam;

EI_w, m_w – bending stiffness and unit mass of lower beam;

c_u, k_u and c_w, k_w – viscous damping and linear stiffness of the layer between beams and the foundation layer, respectively;

Modelowanie odpowiedzi dynamicznej toru



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Double-beam system on nonlinear foundation (with a viscoelastic linear layer between beams)

$$EI_u \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m_u \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) + k_u (u - w) - k_{Nw} w^3 = P(x, t)$$

$$EI_w \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_w \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_w \frac{\partial w}{\partial t} + k_w w - c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) - k_u (u - w) + k_{Nw} w^3 = 0$$

k_{Nw} [N/m⁴] - nonlinear stiffness of foundation

Double-beam system on linear viscoelastic foundation (with a viscoelastic nonlinear layer between beams)

$$EI_u \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m_u \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) + k_u (u - w) + k_{Nu} u^3 = P(x, t)$$

$$EI_w \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_w \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_w \frac{\partial w}{\partial t} + k_w w - c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) - k_u (u - w) - k_{Nu} u^3 = 0$$

k_{Nu} [N/m⁴] - nonlinear stiffness of layer between beams (softening system stiffness)

Modelowanie odpowiedzi dynamicznej toru



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Double-beam system on nonlinear foundation (with a viscoelastic nonlinear layer between beams)

$$EI_u \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m_u \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) + k_u (u - w) - k_{Nw} w^3 + k_{Nu} u^3 = P(x, t)$$

$$EI_w \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_w \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_w \frac{\partial w}{\partial t} + k_w w - c_u \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) - k_u (u - w) +$$

$$k_{Nw} w^3 - k_{Nu} u^3 = 0$$

Such a model cannot be directly transferred to rail track analysis, as it was possible for one beam.

Exceptions:

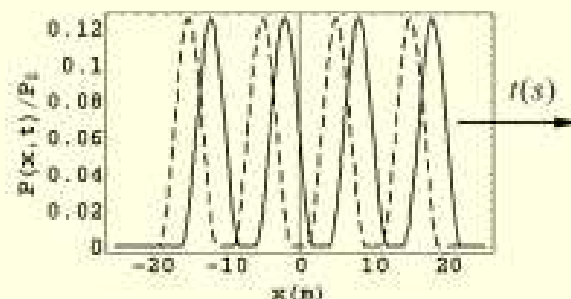
1. new rail model („beam-inside-beam”)
2. Some types of unconventional tracks where trackbed can be considered as stiffened beam

Modelowanie odpowiedzi dynamicznej toru



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

A set of forces constant or harmonically varying in time



Cosine square distribution

$$P(x, t) = \sum_{l=0}^{L-1} \frac{P_0}{2a} \cos^2\left(\frac{\pi(x - Vt - (2a + s_l))}{2a}\right) H(a^2 - (x - Vt - (2a + s_l))^2) e^{i\Omega_l t}$$

s_l - the distance between separated consecutive forces

$2a$ - the spread of single force

Ω_l - the frequency of particular single forces

L - the number of separated forces

P_0 - static force (generated by the weight of train only – separate axes)

$H(\cdot)$ - Heaviside function

Aproksymacja falkowa



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Semi-analytical approaches – analytical methods combined with analytical approximations (without domain discretization)

Numerical calculations are involved at the stage of computational examples preparation only.

General classification of computational approaches:

1. Analytical
2. Semi-analytical
3. Semi-numerical
4. Numerical

Współczynniki falkowe



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Every function from L^2 can be represented as a series:

$$f(x) = \sum \langle f, \Psi_{n,k} \rangle \Psi_{n,k}(x)$$

This kind of approximation can be used for different problems depending on our knowledge about **wavelet coefficients**.

wavelet coefficients (coefficients of multiresolution analysis)

$$c_{n,k} = \langle f, \Phi_{n,k} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Phi_{n,k}(x) dx$$

$$d_{j,k} = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi_{j,k}(x) dx$$

The inner products of the function and the wavelet basis elements.

10

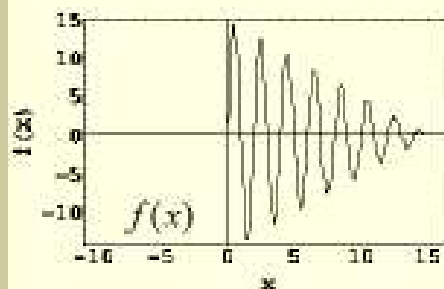
Wavelet based approximation

Original function $f(x)$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ (x-15) \sin(\pi(x+15)) & \text{for } 0 \leq x \leq 15 \\ 0 & \text{for } x > 15 \end{cases}$$

Transformed function $\tilde{f}(x)$:

$$\tilde{f}(\omega) = \frac{\pi(15\pi^2 - (2i + 2i \exp(-15i\omega) + 15\omega)\omega)}{(\pi^2 - \omega^2)^2}$$

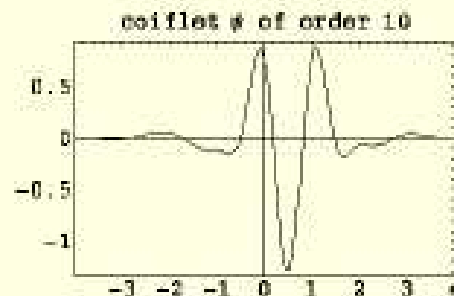


Computational procedure based on coiflet approximation:

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{2^{n+2}} \frac{1}{\pi} \left(\prod_{k=1}^{100} \sum_{j=0}^{17} p_j \exp(i j x 2^{-k-n}) \right) \cdot \sum_{k=-20 \cdot 2^n - 16}^{20 \cdot 2^n - 1} \tilde{f}((k+M)2^{-n}) e^{i k x 2^{-n}} \right\}$$

Coiflet filters defining wavelet of order 6:

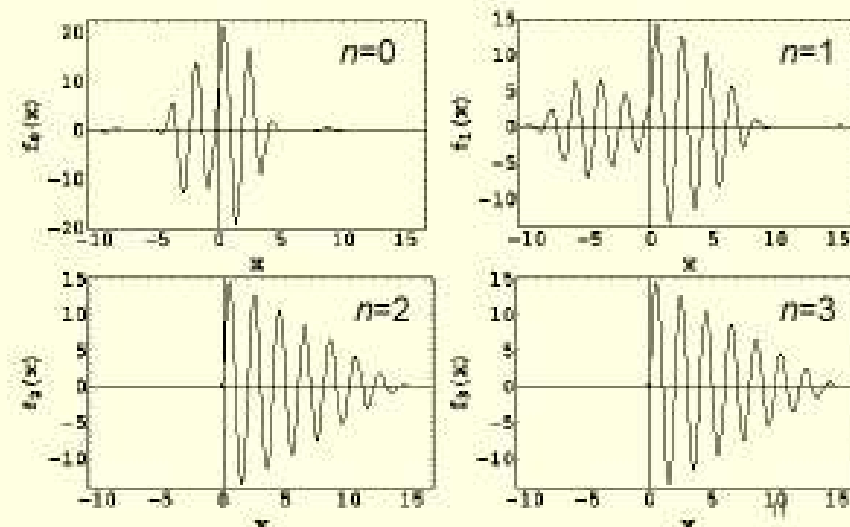
```
-0.0023926338657280031
-0.004932601854180402
0.02714039971139949
0.03064755594619984
-0.1393102370707997
0.08999953071779983
0.6459945432939942
1.116266213257999
0.5381890557079980
-0.09961543386239989
-0.07992313943479994
0.05149146293240031
0.01238869565706006
-0.01583178039254944
-0.002717178600539990
0.002886948664020020
0.0006304993947079994
-0.0003058339734960013
```



(coiflet of order 10)

$$f_3 \approx f$$

„STABILISATION CRITERION”

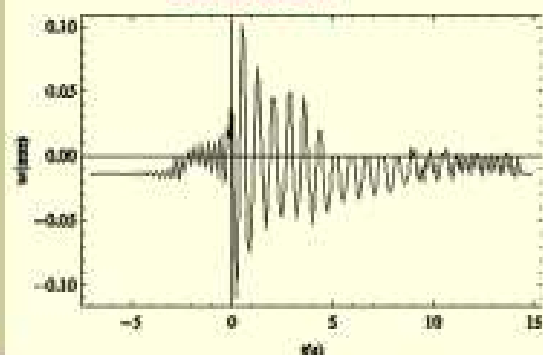


Evaluation of displacement for a multilayered foundation subject to a load moving at the surface

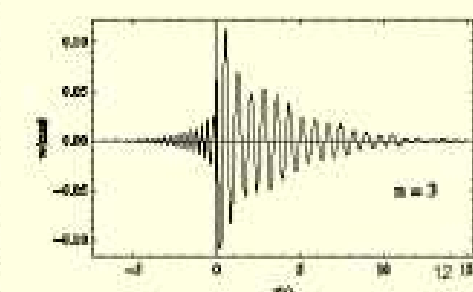
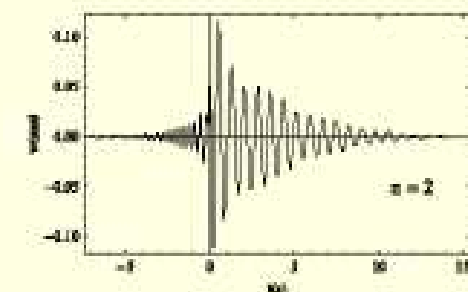
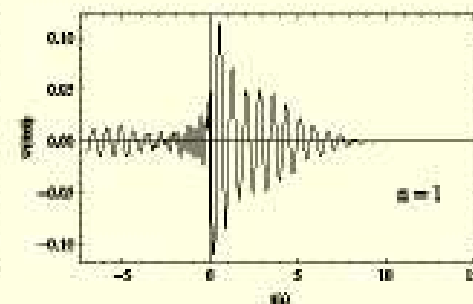
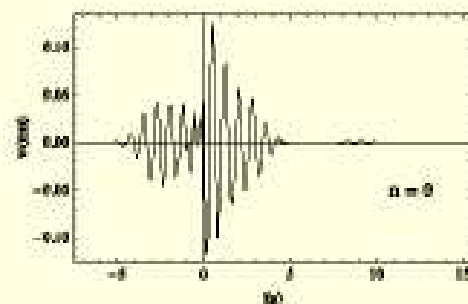
Koziol P, Mares C., Esat I., (2008). Wavelet approach to vibratory analysis of surface due to a load moving in the layer. *International Journal of Solids and Structures*

Numerical instabilities

numerical
solution



wavelet approximation



$$\Omega = 4\pi, V = 80\text{m/s}, h = 20\text{m}$$

$$80\text{ m/s} \approx 1.05 \cdot c_{R2} \approx 0.98 \cdot c_{T2}$$

Two-layer track model (Winkler foundation)

$$EI_r \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m_r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_r \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) + k_r (u - w) + k_{Nr} u^3 - k_{Ns} w^3 = P(x, t)$$

$$EI_s \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_s \frac{\partial w}{\partial t} + k_s w - c_r \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) - k_r (u - w) + k_{Ns} w^3 - k_{Nr} u^3 = 0$$

$u(x, t)$ [m] – vertical vibrations of rails

EI_r [Nm²] – bending stiffness of rail steel

m_r [kg/m] – unit mass of rail

k_r [N/m²] – linear stiffness of the layer between rails and sleepers (including fastening system)

c_r [Ns/m²] – viscous damping of the layer between rails and sleepers (including fastening system)

k_{Nr} [N/m⁴] – nonlinear part of stiffness of the layer between rails and sleepers (including fastening system)

$w(x, t)$ [m] – vertical vibrations of sleepers

m_s [kg/m] – unit mass of sleepers

k_s [N/m²] – linear stiffness of the rail track foundation

c_s [Ns/m²] – viscous damping of the rail track foundation

k_{Ns} [N/m⁴] – nonlinear part of stiffness of the rail track foundation

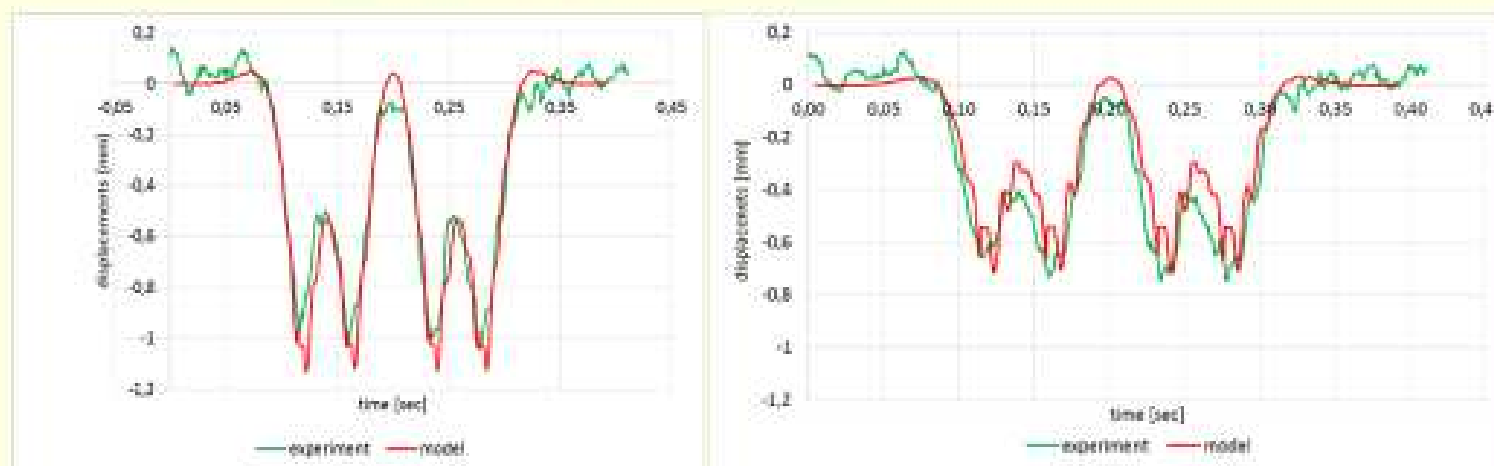
$P(x, t)$ [N/m] – a set of loads generated by axles of train moving uniformly along rails with constant speed V [m/s].

Przykłady



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Two-layer linear model of rail track



Kozioł P. (2016). Experimental validation of wavelet based solution for dynamic response of railway track subjected to a moving train. *Mechanical Systems and Signal Processing*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.02.058>, ISSN 0888-3270, 79, 174-181.

Czyczula W., Kozioł P., Kudła D., Lisowski S., (2017). Analytical evaluation of track response in the vertical direction due to a moving load. *Journal of Vibration and Control*, ISSN 1077-5463, Volume: 23 issue: 18, pages: 2989-3006.

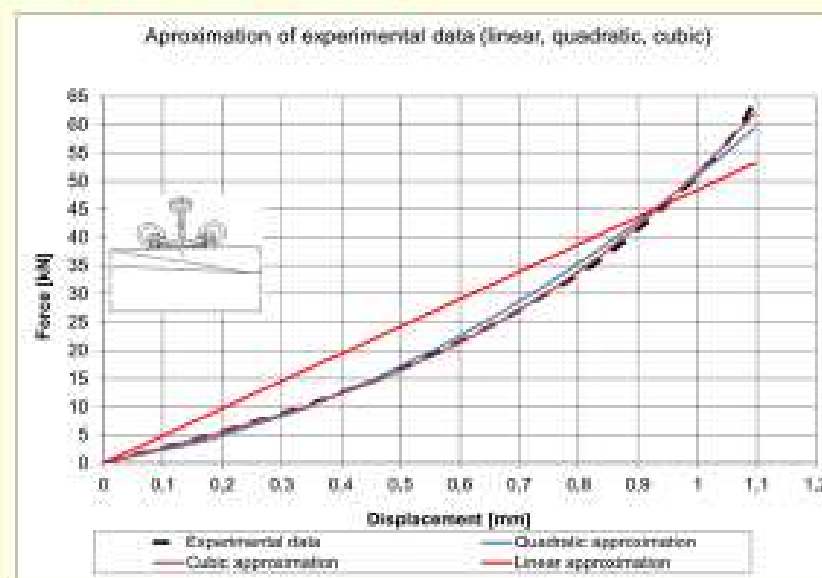
Przykłady



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Analysis of effect of nonlinearity of fastening system on railway track response

(so far only nonlinearity of sleeper foundation was taken into account)



Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu. Politechnika Krakowska

15

Przykłady

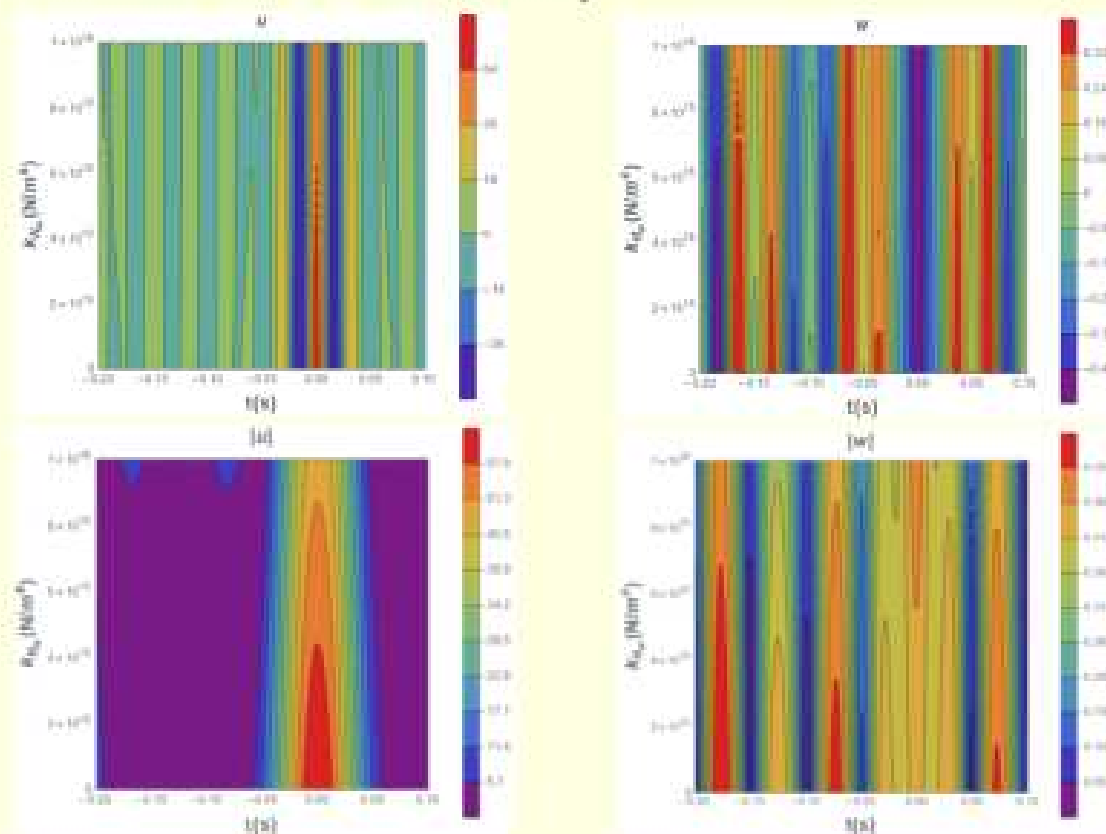
PhD thesis Rafał Pilecki "Dynamic response of continuous multilayer systems to moving loads" (supervisor: Piotr Kozioł)



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Non-triviality of the problem

10 Hz; $V = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $l = 10\text{m}$; 2 forces



16

Przykłady

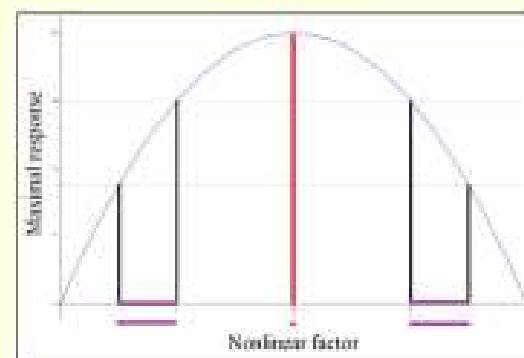
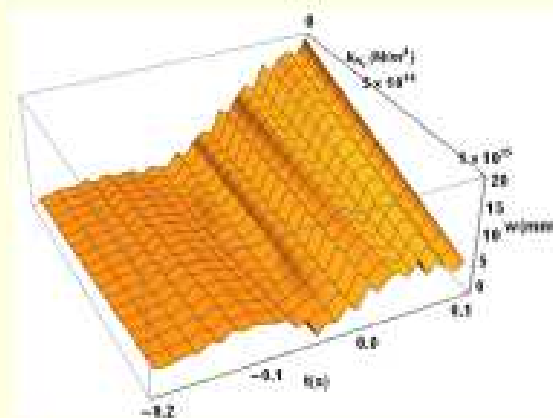
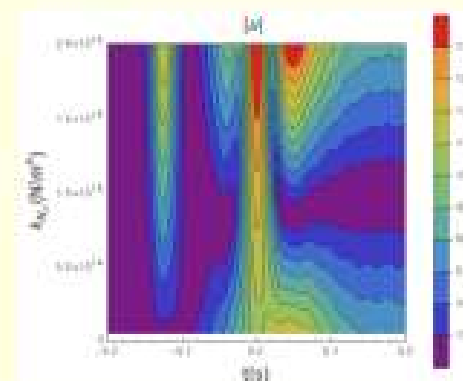
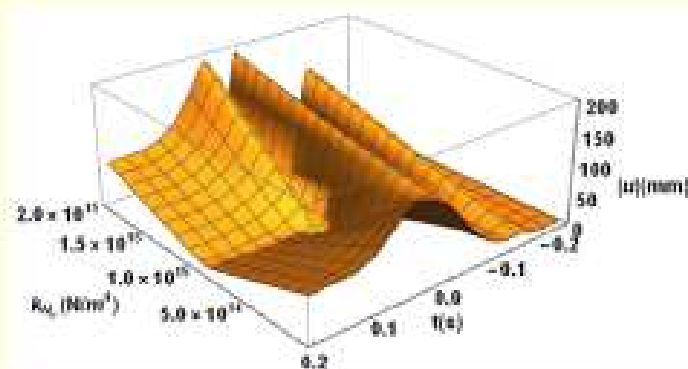


PhD thesis Rafał Pilecki "Dynamic response of continuous multilayer systems to moving loads" (supervisor: Piotr Kozioł)

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Non-trivial problem

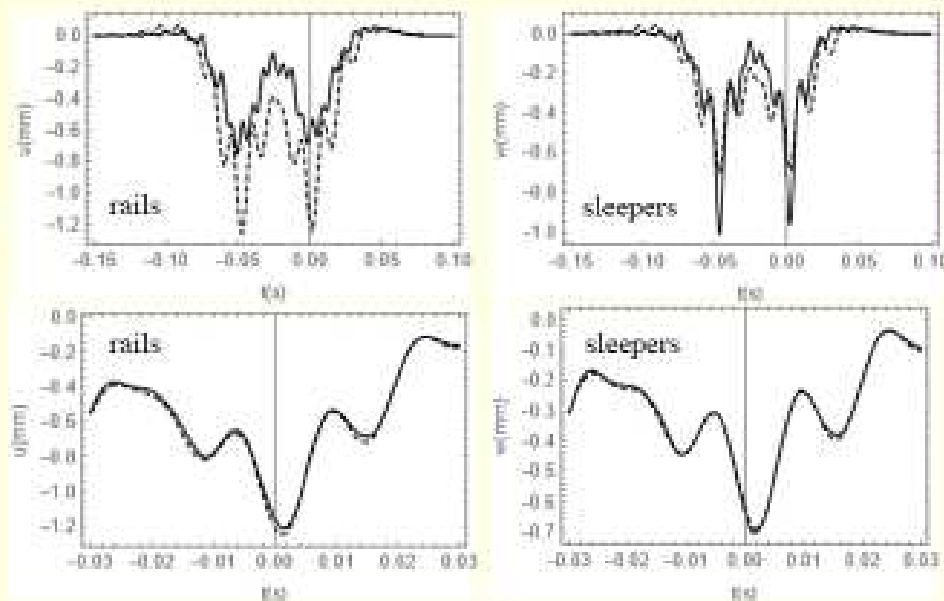
20 Hz; $V = 80 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $k_{Nw} = 10^{15} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$; $P = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$; $l = 10\text{m}$; 2 forces



17

Computational examples: two-layer model of rail track with nonlinear fastening system and nonlinear foundation

$P = 78.33 \cdot 10^4 \text{ N/m}$, $EI_r = 6.4 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2$, $m_r = 60 \text{ kg/m}$, $k_r = 8.8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$, $c_r = 0.06 \cdot \sqrt{k_r \cdot m_r}$, $m_s = 266.67 \text{ kg/m}$, $k_s = 8.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$, $c_s = 0.06 \cdot \sqrt{k_s \cdot m_s}$, $V = 200 \text{ km/h}$, $\Omega_k = 2\pi \cdot f_{\Omega_k}$, $a = 0.0075 \text{ m}$, configuration of EMU250 bogie, i.e. 2700 mm between axles, the length of the rail surface irregularity 0.8 m.

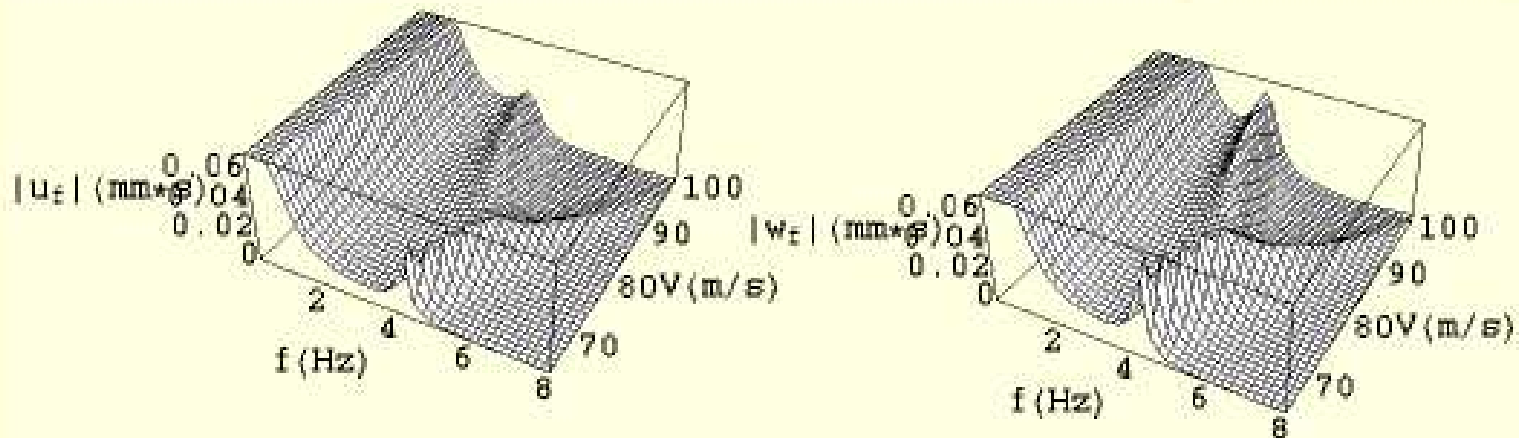


linear – dashed, nonlinear –
 solid
 $(k_{Nr} = 5 \cdot 10^{13} \text{ N/m}^4, k_{Ns} = 10^{13} \text{ N/m}^4)$

“Zoomed” vertical vibrations:
 linear – dashed, nonlinear –
 solid
 $(k_{Nr} = 10^{13} \text{ N/m}^4, k_{Ns} = 5 \cdot 10^{13} \text{ N/m}^4)$

Beam on (or inside) viscoelastic half-space

Kozioł P., Mares C., (2010). Wavelet approach for vibration analysis of fast moving load on a viscoelastic medium. Shock and Vibration, ISSN 1070-9622, 17 (4-5), 461-472



$$V \approx 77 \text{ m/s} \approx c_R$$

The „zoomed” plots of the amplitude spectra for a constant load.

(the moment of the boom vibration initiation)

The “splitting point” is placed at a velocity near 77m/s close to the Rayleigh velocity in the lower layer.

Przykłady

Błażejewski, Koziol P., Luczak M., (2014). Acoustical analysis of enclosure as initial approach to vehicle induced noise analysis comparatively using STFT and Wavelets. *Archives of Acoustics*



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

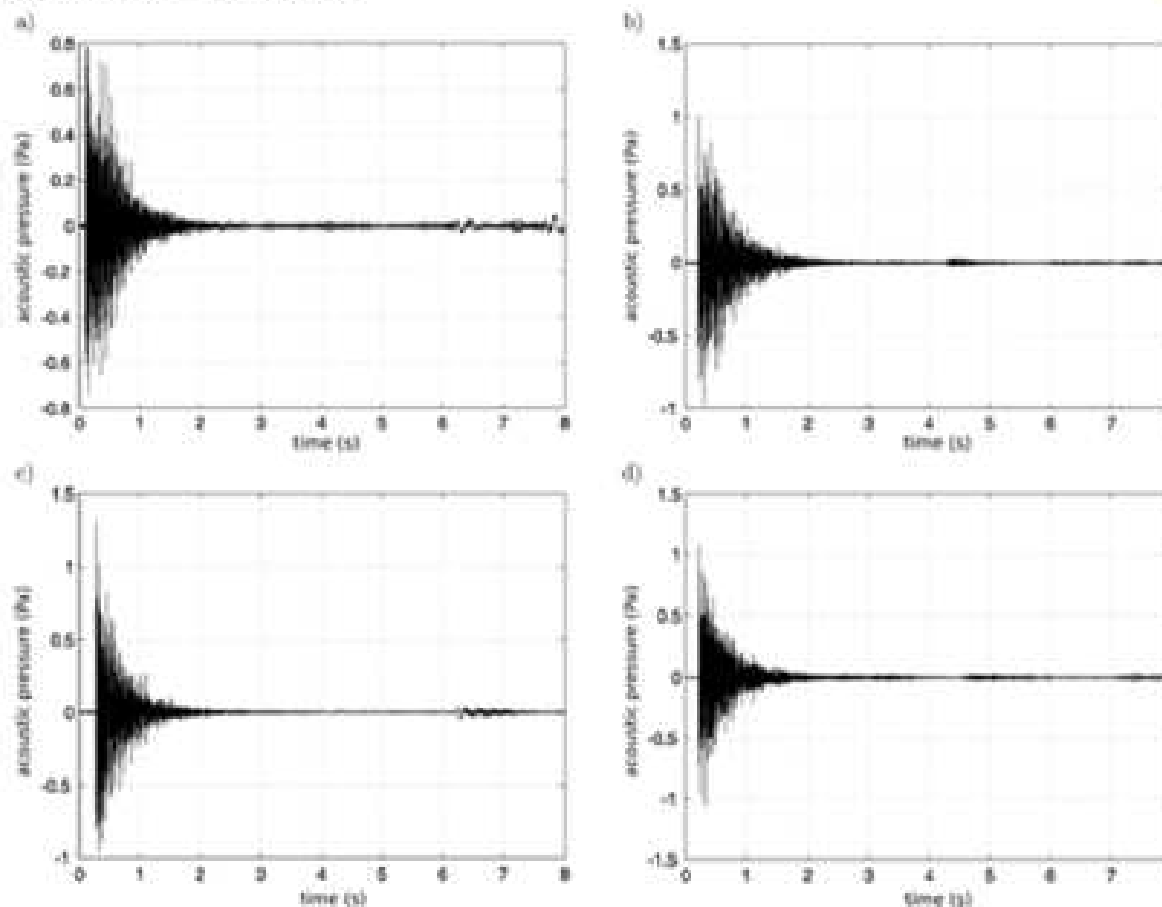


Fig. 2. The acoustic signal recorded in different places of the room: a) pos. 1, b) pos. 2, c) pos. 3, d) pos. 4 after the acoustic Gaussian impulse was emitted.

20

Przykłady

Błażejowski, Kozioł P., Luczak M., (2014). Acoustical analysis of enclosure as initial approach to vehicle induced noise analysis comparatively using STFT and Wavelets. *Archives of Acoustics*



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

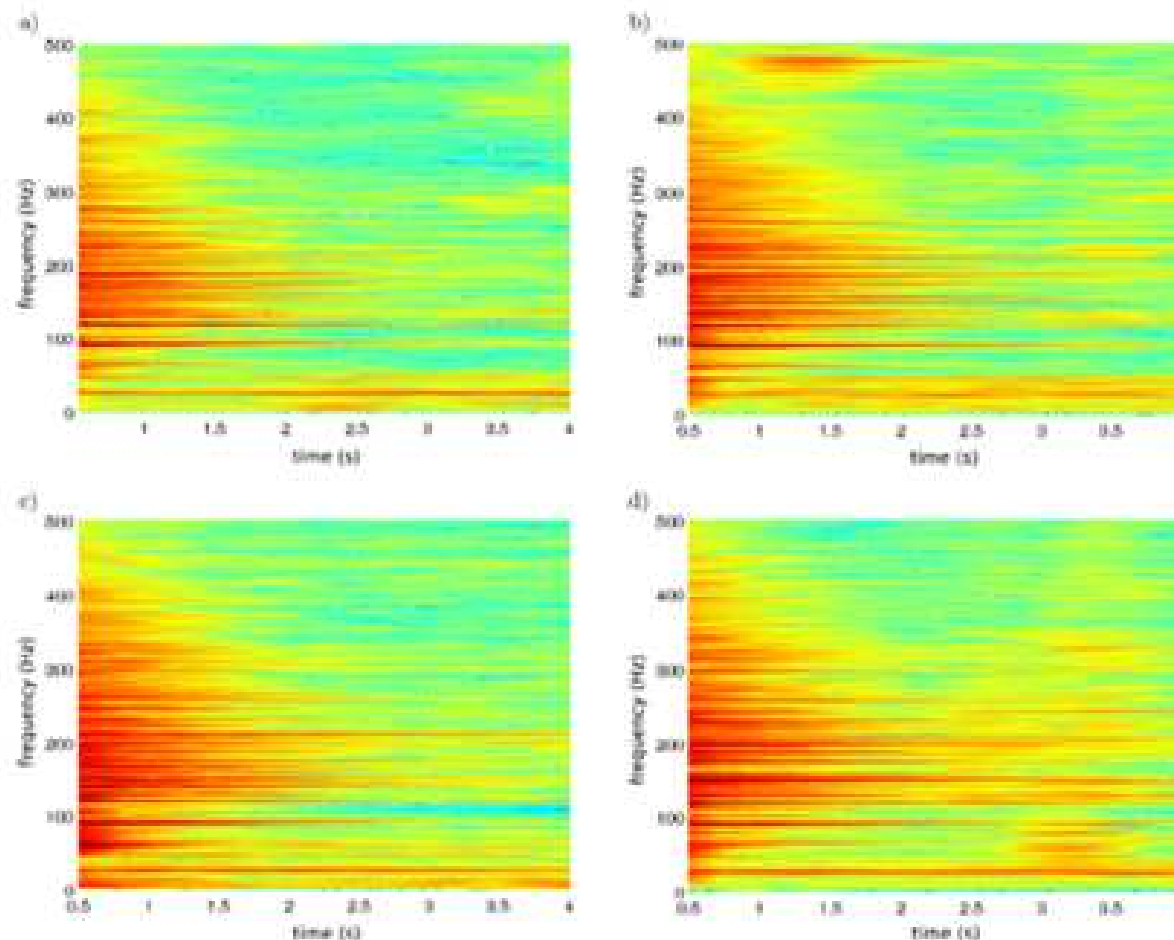


Fig. 3. The spectrograms of the signals in different locations in the room: a) pos. 1, b) pos. 2, c) pos. 3, d) pos. 4.

21

Przykłady

Błażejewski, Koziol P., Luczak M., (2014). Acoustical analysis of enclosure as initial approach to vehicle induced noise analysis comparatively using STFT and Wavelets. *Archives of Acoustics*



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

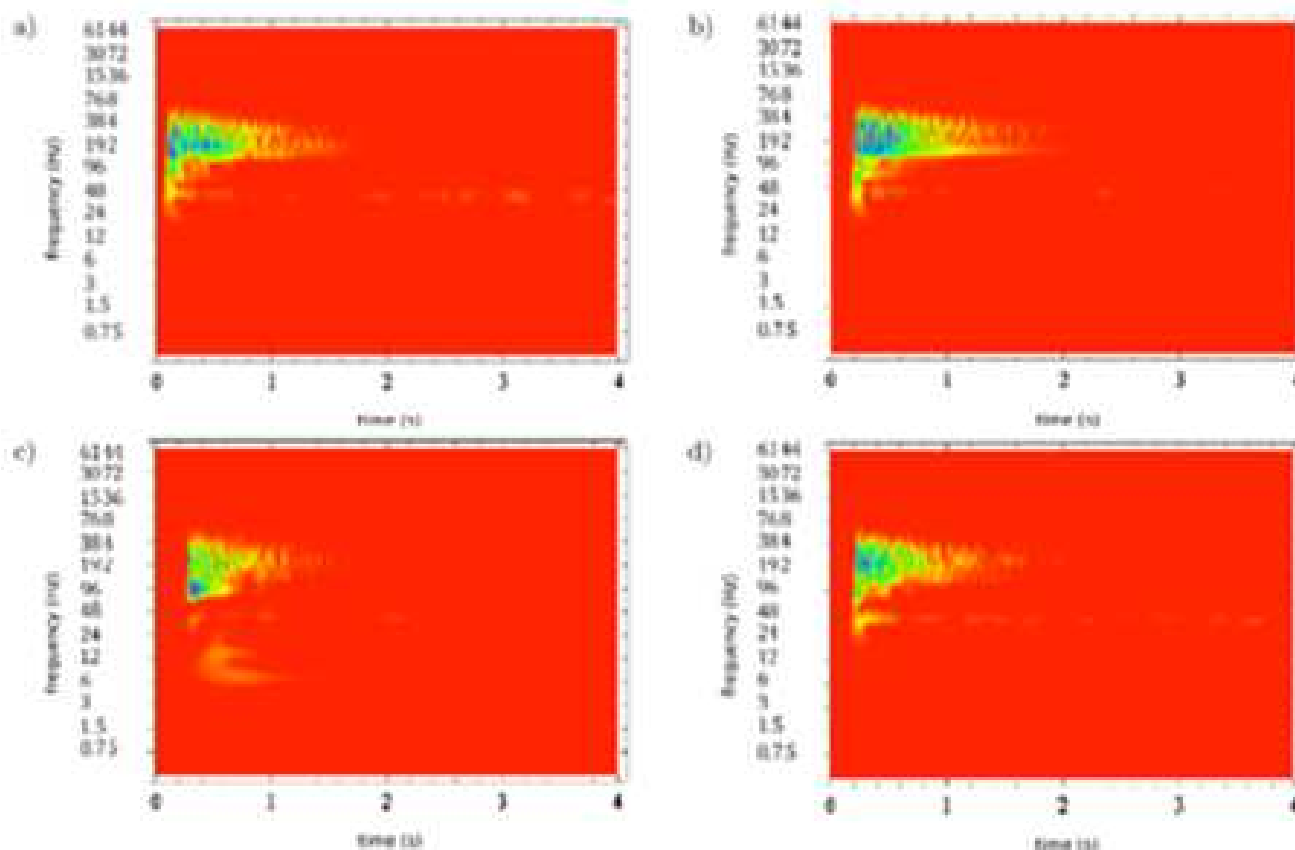


Fig. 7. Scalograms of the specified signals measured at: a) pos. 1, b) pos. 2, c) pos. 3, d) pos. 4, transformed by using the wavelet transform with introduced Gabor wavelet of frequency 6.

Instytut Kolejnictwa

Dziękujemy za uwagę

dr hab. Piotr Koziol, prof. PK

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej
Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu
piotr.koziol@pk.edu.pl



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Warszawa, 09.04.2024



Identyfikacja sygnałów pomiarowych pozyskanych przy przejeździe pociągu po torze z rozpoznaniem uszkodzeniem

dr hab. Piotr Koziół, prof. PK

Politechnika Krakowska

Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu

piotr.koziol@pk.edu.pl

www.wil.pk.edu.pl

dr inż. Piotr Tokaj

Instytut Kolejnictwa

Pracownia Hamulców w Krakowie

ptokaj@ikolej.pl

www.ikolej.pl

Warszawa, 9 kwietnia 2024 r.